

# 締固めた土のコラプス沈下量に及ぼす試験条件の影響

基礎地盤コンサルタンツ(株) 正会員 亀井健史  
 同上 正会員 榎本雅夫

## 1. はじめに

不飽和土は、吸水による飽和度の上昇に伴って体積変化が生じる。このような水の浸透に伴う不飽和土の体積変化挙動の中で、地盤工学上大きな問題の一つとして表われるコラプス沈下現象がある。不飽和地盤の水浸に伴うコラプス沈下は、土の種類、地盤の状態(飽和度、乾燥密度)およびその地盤に作用している上載圧等に大きく影響を受ける<sup>1)・2)</sup>。また、実務の観点からみると、盛土等の締固めた地盤では、このような不飽和土の特性を十分考慮した設計・施工が必要と考えられる。よって、地盤への水の浸透に伴うコラプス沈下現象の解明と地盤の締固め条件に関する定量的な検討は、地盤工学上必要不可欠であるものと考えられる。

上記の点に着目して、本研究では不飽和土の吸水に伴うコラプス沈下挙動を定量的に把握するため、2種類の土試料を対象にコラプス沈下試験を行った。供試体の内的条件としては種々の初期飽和度、初期乾燥密度を対象とし、外的条件としては種々の上載圧を各供試体に作用させることにした。また、締固め度に着目したコラプス沈下量の定量的な評価に基づき、盛土等の締固め施工時における室内試験結果の施工管理への適用性を明らかにしている。

## 2. 試料および実験方法

試料としては、シルト質土(DLクレイ)、粘性土(カオリン)の2種類を用いた<sup>3)・4)</sup>。供試体は、より均一な供試体が得られ、工学的観点からも優れた締固め方法として評価できる静的締固めにより作製した<sup>5)</sup>。供試体の内的条件としては、コラプス沈下が生じやすい条件を考慮して、初期乾燥密度 $\rho_{di}$ が $\rho_{dmax}$ の90%以下となるように設定した。そのため、DLクレイでは、初期飽和度 $S_{ri}=20, 40\%$ 、初期乾燥密度 $\rho_{di}=1.10, 1.20, 1.30\text{g/cm}^3$ 、カオリンに関しては $S_{ri}=20, 40, 60\%$ 、 $\rho_{di}=1.00, 1.10, 1.20\text{g/cm}^3$ を対象としている。

本実験は、はじめに圧密リング内の供試体に不飽和状態のまま上載圧を負荷して圧縮変形量を測定し、その圧縮変形が終了した時点で供試体下面からの空気の入出を抑制するためセラミックディスクを介して水を吸水させ、この時の供試体のコラプス沈下量および吸水量(飽和度)の経時変化を測定している。このプロセスを各上載圧条件下で実施した。

コラプス沈下試験の概念を図-1示す。図中の任意の上載圧下における水浸に伴う間隙比の変化がコラプス沈下量に相当し、その水浸に伴う体積変化量比 $\Delta H_c/H_{ci}$ は次式で表わされる。

$$\frac{\Delta H_c}{H_{ci}} = \frac{\Delta e}{1+e_i} \quad \dots (1)$$

ここで、 $e_i$ は水浸前の間隙比、 $\Delta e$ は水浸に伴う間隙比の変化量を示している。また、今回の試験では、同じ $S_{ri}$ 、 $\rho_{di}$ を有する7本の供試体に対して7段階の上載圧を載荷させた。

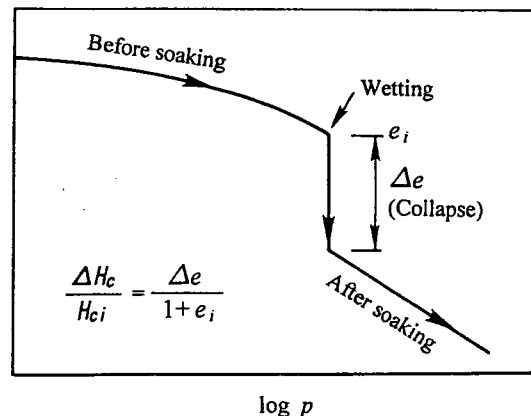


図-1 コラプス沈下試験の概念図

### 3. 実験結果および考察

図-2(a)~(c)は、DLクレーを対象に初期飽和度 $S_{r1}$ 、初期乾燥密度 $\rho_{d1}$ の異なる供試体から得られた初期状態、載荷後および水浸後の間隙比 $e$ と上載圧 $p$ の関係を示している<sup>3)</sup>。供試体の $S_{r1}$ 、 $\rho_{d1}$ によらず上載圧による圧縮変形は任意の圧力に至るまではほとんど発生せず、その圧力を越えると圧縮変形量は上載圧の増加に伴い増大している。また、その変形量は、 $\rho_{d1}$ が小さいほど大きくなっている。さらに、水浸に伴う圧縮変形量（コラプス沈下量）も、全体的には供試体の $\rho_{d1}$ が小さいほど大きいことがわかる。

カオリンから得られた同様の試験結果を図-3(a)~(c)に示す<sup>4)</sup>。不飽和状態での上載圧による供試体の圧縮特性をみると、DLクレーとほぼ同様の傾向を示している。また、 $\rho_{d1}=1.10, 1.20\text{g/cm}^3$ の供試体では、低い

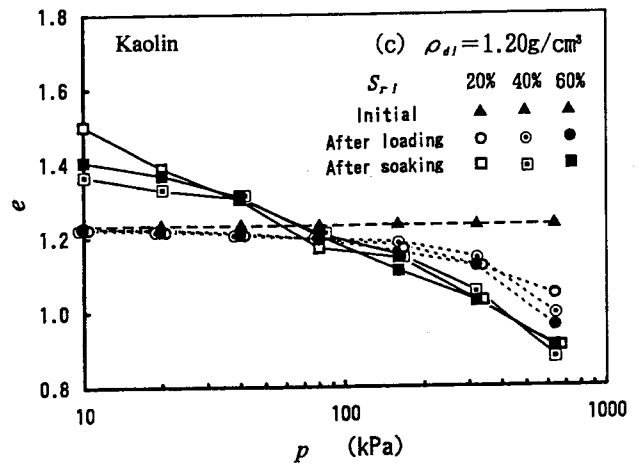
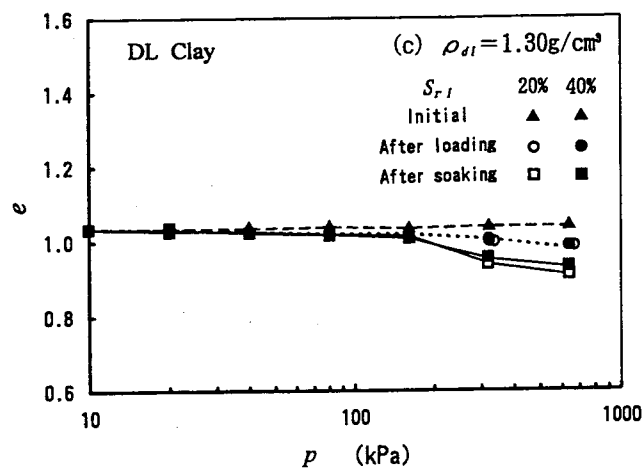
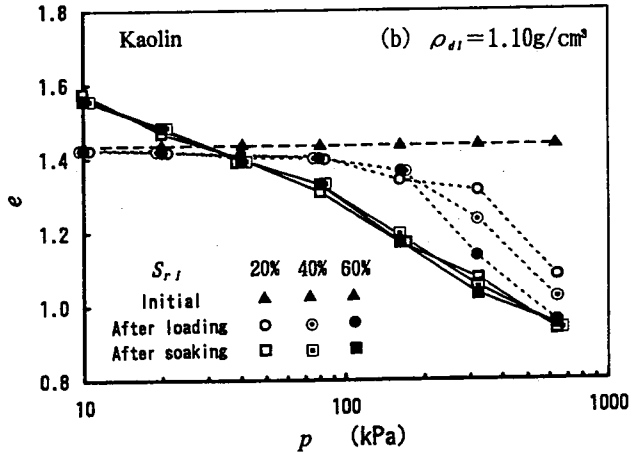
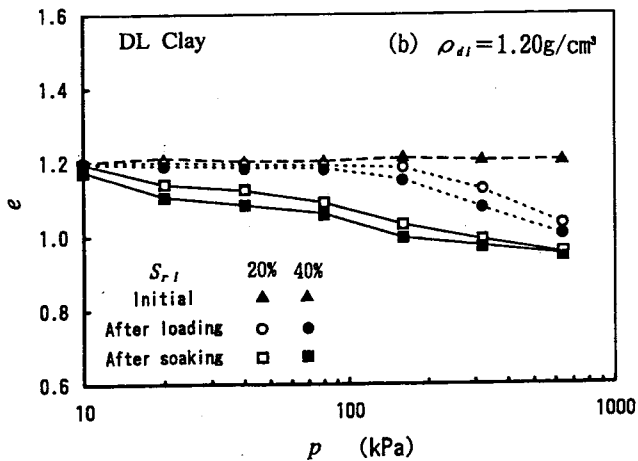
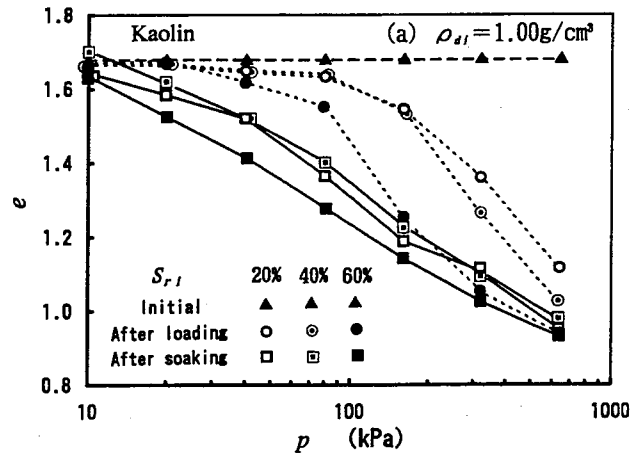
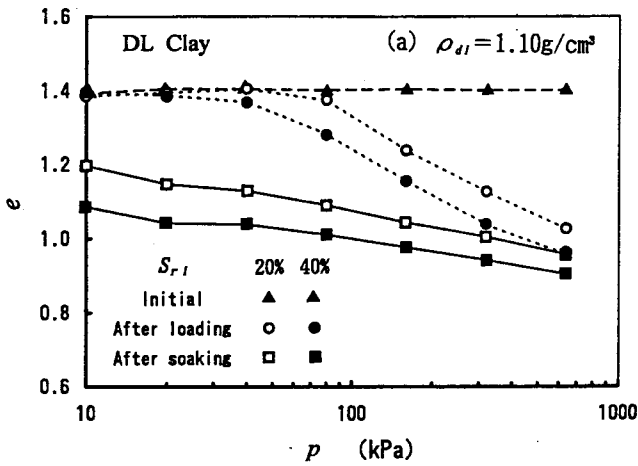


図-2 初期状態、載荷後および水浸後の間隙比 $e$ と上載圧 $p$ の関係(DLクレー)<sup>3)</sup>

図-3 初期状態、載荷後および水浸後の間隙比 $e$ と上載圧 $p$ の関係(カオリン)<sup>4)</sup>

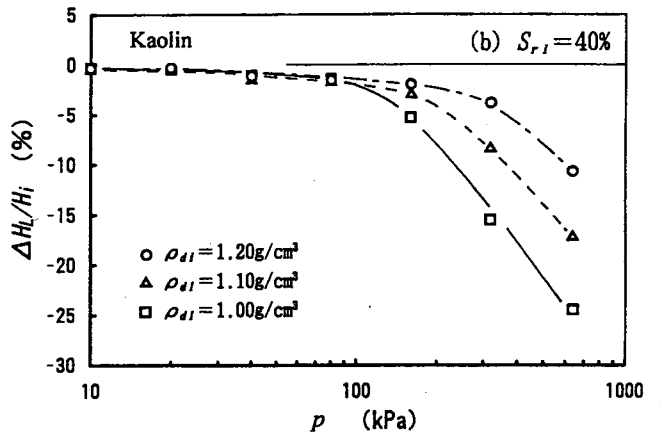
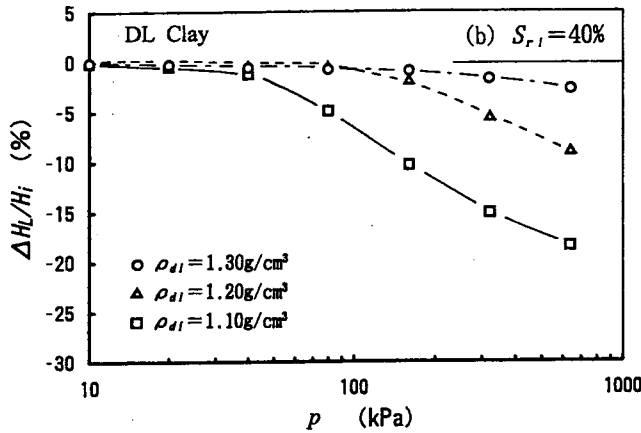
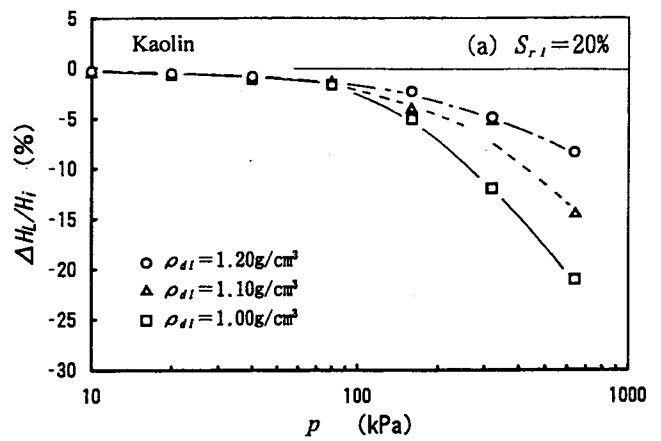
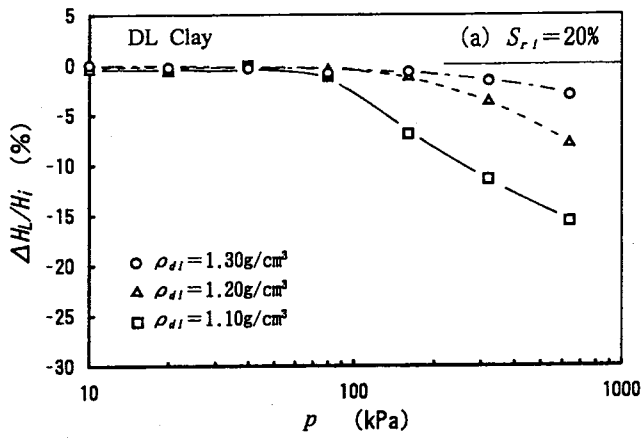


図-4 上載圧負荷に伴う体積変化量比  $\Delta H_L/H_i$  と上載圧  $p$  の関係 (DLクレー)

上載圧下で水浸に伴い膨潤が生じている。その膨潤量は、 $p$ の増加に伴い小さくなっており、その後圧縮に転じて、コラプス沈下が発生している。また、 $\rho_{d,i}$ の大きな供試体ほど膨潤挙動が卓越しており、コラプス沈下は大きな $p$ の領域で生じている。

図-4(a), (b)は、DLクレーの初期飽和度 $S_{r,i}$ 、初期乾燥密度 $\rho_{d,i}$ の異なる供試体から得られた上載圧負荷に伴う体積変化量比 $\Delta H_L/H_i$ と上載圧 $p$ の関係を示している。不飽和状態での上載圧による供

試体の圧縮変形は、 $S_{r,i}$ 、 $\rho_{d,i}$ によらず任意の圧力に至るまではほとんど発生せず、 $S_{r,i}=40\%$ 、 $\rho_{d,i}=1.10\text{g/cm}^3$ の供試体を除き、 $p=80\text{kPa}$ 程度を越えると圧縮変形が生じ始める。また、その圧縮変形量は上載圧の増加に伴って大きくなっている。このことより、不飽和状態の供試体はサクションにより土の構造が保持されているため、ある上載圧までは圧縮変形が生じにくくなっているものと考えられる。さらに、同じ上載圧下での $\Delta H_L/H_i$ は、供試体の $\rho_{d,i}$ が小さいほど大きくなっている。 $\Delta H_L/H_i$ に $S_{r,i}$ が及ぼす影響に着目すると、 $\rho_{d,i}=1.30\text{g/cm}^3$ の供試体では明瞭な差異は見られないが、 $\rho_{d,i}=1.10, 1.20\text{g/cm}^3$ の供試体では、同じ上載圧下で、 $S_{r,i}=20\%$ に比べて $S_{r,i}=40\%$ の場合にわずかではあるが $\Delta H_L/H_i$ が大きく表われている。

同様に、カオリンの初期飽和度 $S_{r,i}$ 、初期乾燥密度 $\rho_{d,i}$ の異なる供試体から得られた上載圧負荷に伴う体積変化量比 $\Delta H_L/H_i$ と上載圧 $p$ の関係を図-5(a)~(c)に示す。図より、カオリンでの試験結果においても、上述したDLクレーの場合とほぼ同様の傾向がみられる。また、カオリンでは、DLクレーに比べ、 $p=160\text{kPa}$ 程度以

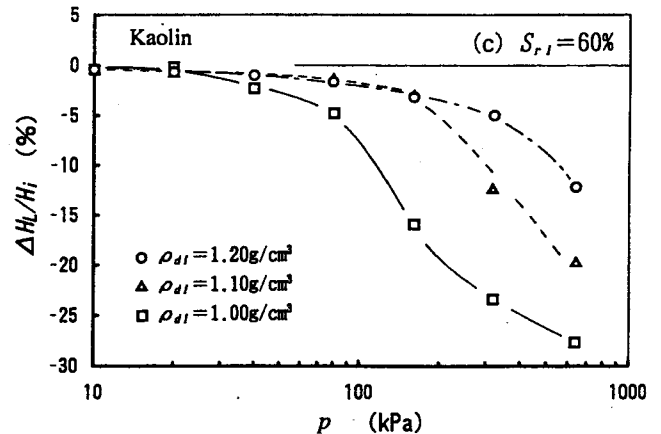


図-5 上載圧負荷に伴う体積変化量比  $\Delta H_L/H_i$  と上載圧  $p$  の関係 (カオリン)

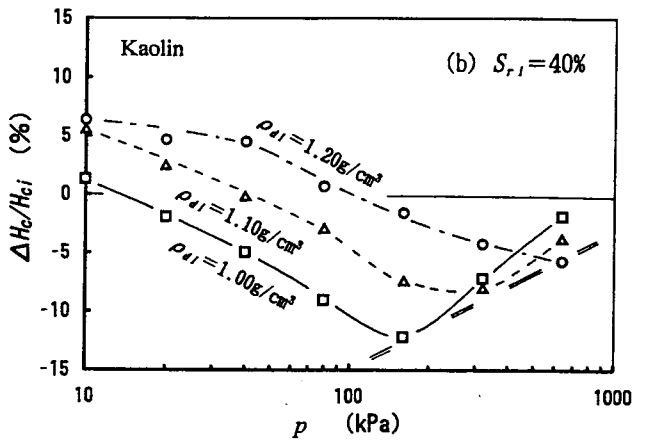
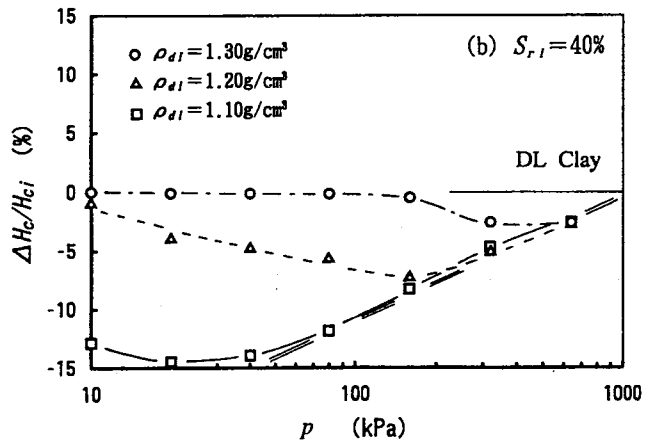
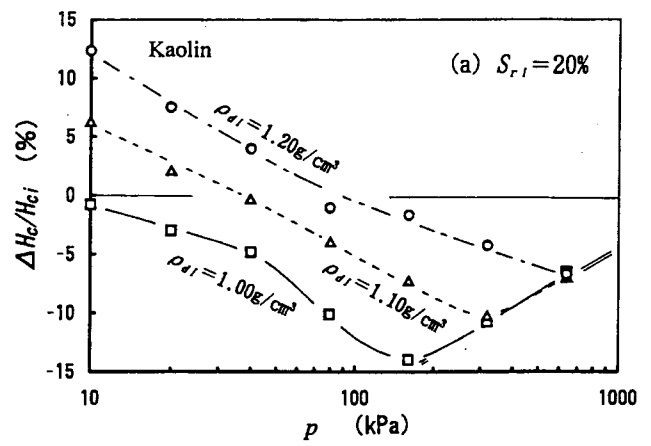
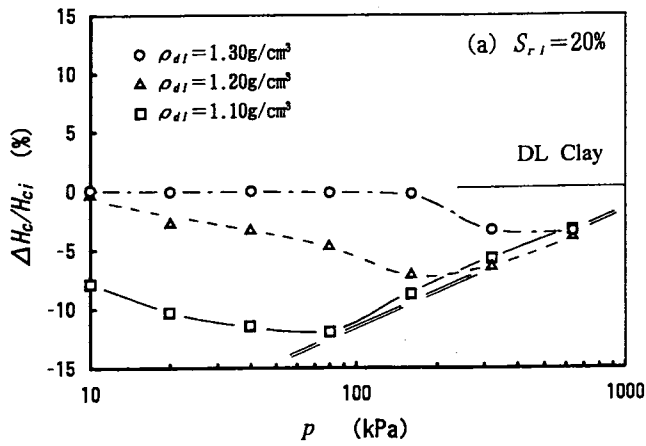


図-6 水浸に伴う体積変化量比  $\Delta H_c/H_{c_i}$  と上載圧  $p$  の関係 (DLクレ-)<sup>3)</sup>

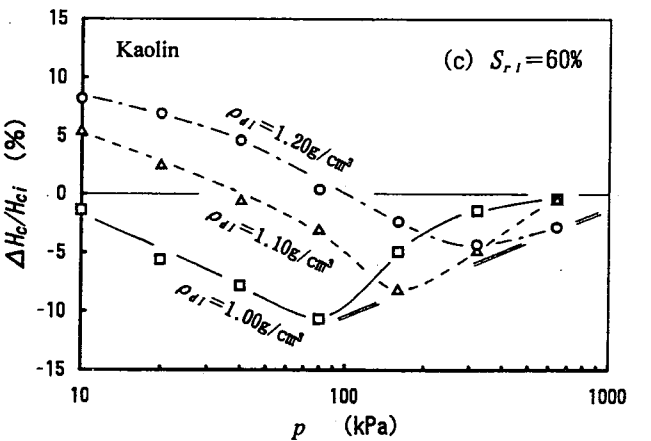


図-7 水浸に伴う体積変化量比  $\Delta H_c/H_{c_i}$  と上載圧  $p$  の関係 (カオリン)<sup>4)</sup>

上で、 $p$ の増加に伴う $\Delta H_c/H_{c_i}$ の増加傾向が大きくなっている。

図-6(a), (b)は、DLクレ-の水浸に伴う体積変化量比 $\Delta H_c/H_{c_i}$ と上載圧 $p$ の関係を示している<sup>3)</sup>。図より、 $\rho_{d_i}=1.10, 1.20\text{g/cm}^3$ の場合には、任意の圧力に達するまでは、 $\Delta H_c/H_{c_i}$ は $p$ の増加に伴って大きくなり、ピーク値を示した後減少している。また、 $\Delta H_c/H_{c_i}$ がピーク値を示す点に着目すると、コラプス沈下の最大量は $\rho_{d_i}$ の減少に伴い増加し

ており、コラプス沈下量の最大値が大きくなるのに伴い、その時の上載圧 $p$ はユニークな直線に沿って減少する。このことは、Lawton et al.<sup>6)</sup>が示した結果と一致し、供試体の初期状態 ( $S_{r_i}, \rho_{d_i}$ ) によらず、上載圧  $p$  に対する限界のコラプス沈下量が存在することを意味している。さらに、水浸に伴う体積変化挙動は初期乾燥密度  $\rho_{d_i}$  の影響を大きく受け<sup>7), 8)</sup>、 $\rho_{d_i}$  の大きな供試体ほどコラプス沈下量が小さくなっており、 $\rho_{d_i}=1.30\text{g/cm}^3$  の供試体では、 $p=160\text{kPa}$  程度までコラプス沈下はほとんど認められない。また、 $\rho_{d_i}=1.10\text{g/cm}^3$  を有する供試体では、 $p=4\text{kPa}$  以下の範囲で、 $S_{r_i}=20\%$  に比べ  $S_{r_i}=40\%$  の場合に大きな沈下量が認められるが、 $\rho_{d_i}=1.20, 1.30\text{g/cm}^3$  の供試体では、 $S_{r_i}$  による有為な差は認められなかった。

図-7(a)~(c)は、カオリンでの水浸に伴う体積変化量比 $\Delta H_c/H_{c_i}$ と上載圧 $p$ の関係を示している<sup>4)</sup>。図より、DLクレ-とは異なり上載圧が低い領域においては、膨潤挙動が卓越しており、 $\rho_{d_i}$ の大きな供試体ほど、膨潤量が大きくなっている。また、 $p$ の増加に伴い膨潤量は減少し、その後体積変化は圧縮変形 (コラプス沈

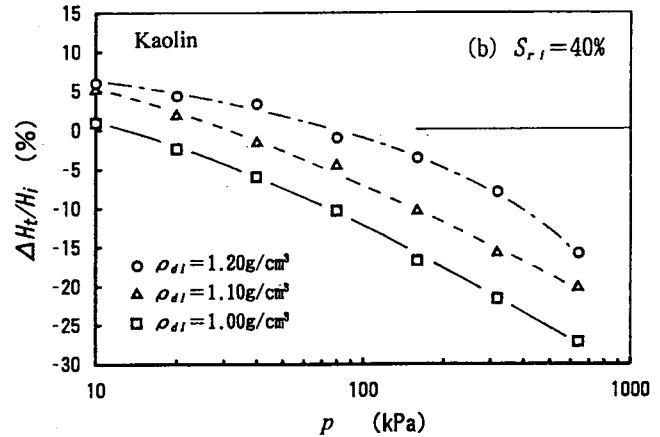
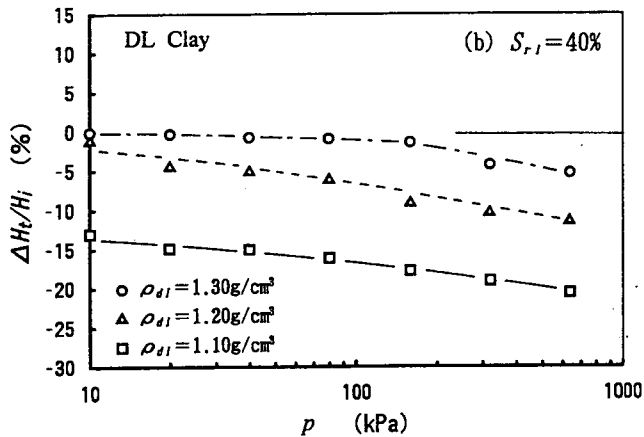
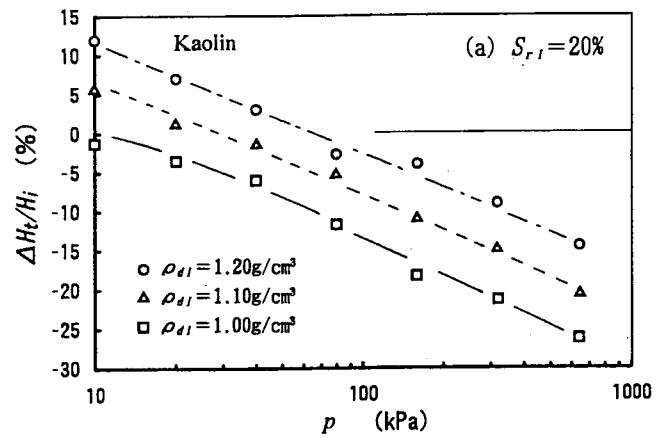
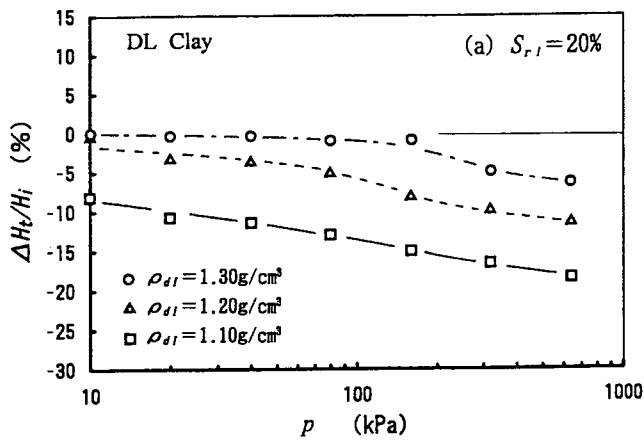


図-8 上載圧負荷及び水浸に伴う総体積変化量比  $\Delta H_t/H_t$  と上載圧  $p$  の関係 (DLクレー)

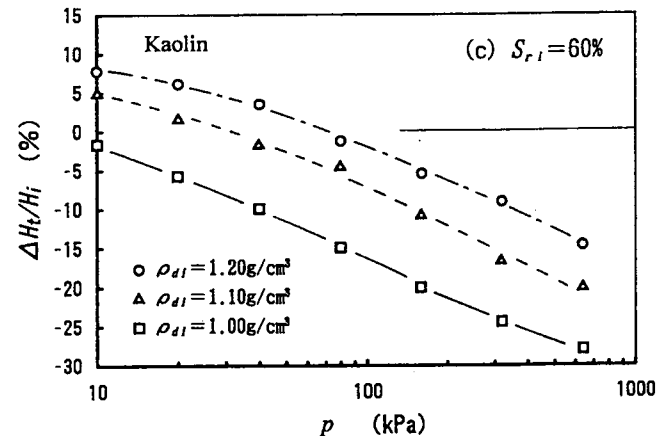


図-9 上載圧負荷及び水浸に伴う総体積変化量比  $\Delta H_t/H_t$  と上載圧  $p$  の関係 (カオリン)

下) に転じる。コラプス沈下挙動を示す上載圧  $p$  の範囲では、DLクレーと同様、 $p$  の増加に伴ってコラプス沈下量は大きくなり、ピーク値を示した後減少しており、コラプス沈下量のピーク値は、供試体の  $S_{r,i}$  によらず  $\rho_{d,i}$  が小さいほど大きくなっている。また、カオリンより得られた結果においても、DLクレーで認められたように、上載圧に対するコラプス沈下量の限界値が存在していることがわかる。

図-6,7を比較すると、カオリンの膨潤性が卓越しているのに比べ、DLクレーはカオリンよりも大きな  $\rho_{d,i}$  の供試体でも膨潤が生じておらず、小さな  $\rho_{d,i}$  を有する供試体では、低い上載圧下においても大きなコラプス沈下量を示している。このことより、既往の研究<sup>2)</sup>で報告されているように、シルト質土がコラプス沈下を生じやすい材料であることがわかる。

図-8(a), (b)は、DLクレーの上載圧の負荷および水浸に伴う総体積変化量比  $\Delta H_t/H_t$  と上載圧  $p$  の関係を示している。図より、 $p=160\text{kPa}$ 以下の範囲での  $\rho_{d,i}=1.30\text{g/cm}^3$  を有する供試体を除くと、 $S_{r,i}$ ,  $\rho_{d,i}$  によらず、 $\Delta H_t/H_t$  は  $p$  の増加に伴いほぼ直線的に変化する傾向を示しており、同じ上載圧下では、 $\rho_{d,i}$  が小さいほど  $\Delta H_t/H_t$  の変化量が大きくなっている。また、 $\rho_{d,i}=1.10\text{g/cm}^3$  の供試体では、同じ上載圧条件下においては  $S_{r,i}=20\%$  の供試体に比べ、 $S_{r,i}=40\%$  の場合に  $\Delta H_t/H_t$  がある程度大きな値を示している。

カオリンより得られた上載圧の負荷および水浸に伴う総体積変化量比  $\Delta H_t/H_t$  と上載圧  $p$  の関係を図-9(a)~(c)に示す。 $\Delta H_t/H_t$  は、 $p$  の増加に伴い膨張から圧縮にわたり連続的に変化しており、 $\rho_{d,i}$ ,  $S_{r,i}$  によらず

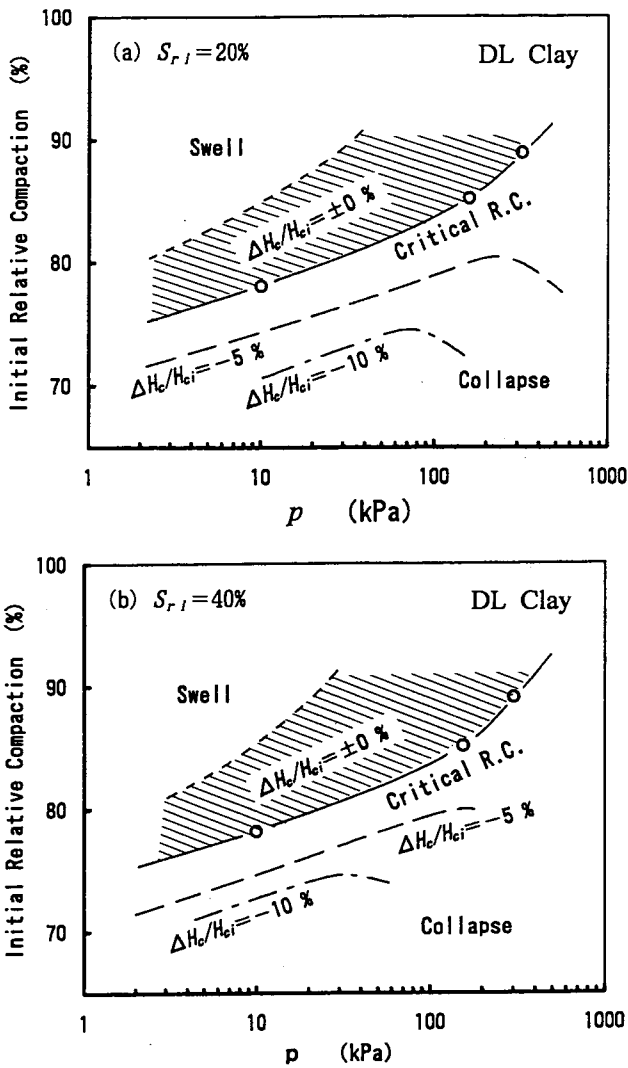


図-10 初期Relative Compactionと上載圧  $p$  に対する水浸に伴う体積変化量比  $\Delta H_c/H_{c,i}$  の関係 (DLクレ-)<sup>3)</sup>

ほぼ一樣な変化傾向を示している。また、DLクレ-に比べカオリンでは、 $p$ の増加に伴う  $\Delta H_c/H_{c,i}$  の変化量が大きく表われており、上載圧の影響を強く受けている。さらに、同じ上載圧下では、 $\rho_{d,i}$  が小さいほど膨潤量は小さくなり、逆に圧縮量が大きくなっている。このように、 $\Delta H_c/H_{c,i}$  に与える  $\rho_{d,i}$  の影響は大きいですが、これに比べ  $S_{r,i}$  の違いによる顕著な傾向は認められない。

Lawton et al.<sup>6)</sup> が示したコラプス沈下が生じない限界の締固め度 (Critical Relative Compaction) に着目し、DLクレ-の初期Relative Compaction (R. C.) と上載圧  $p$  に対する水浸に伴う体積変化量比  $\Delta H_c/H_{c,i}$  の関係を図-10(a), (b) に示す<sup>3)</sup>。図より、 $S_{r,i}$  によらず Critical Relative Compaction (C. R. C.) は、 $p$  の増加に伴って大きくなることを示している。また、DLクレ-では、図中の斜線で示したように、体積変化を生じない締固め度 (R. C.) の範囲が存在し、R. C. がこの範囲を越えると供試体は膨潤挙動を示し、C. R. C. よりも小さい場合には、供試体は水浸に伴いコラプス沈下を生じる。さらに、コラプス沈下を生じる領域では、 $\Delta H_c/H_{c,i}$  が一定値を示す R. C. は C. R. C. と同様に  $p$  の増加に伴い大きくなり、ピークを示した後わずかに減少する。このこ

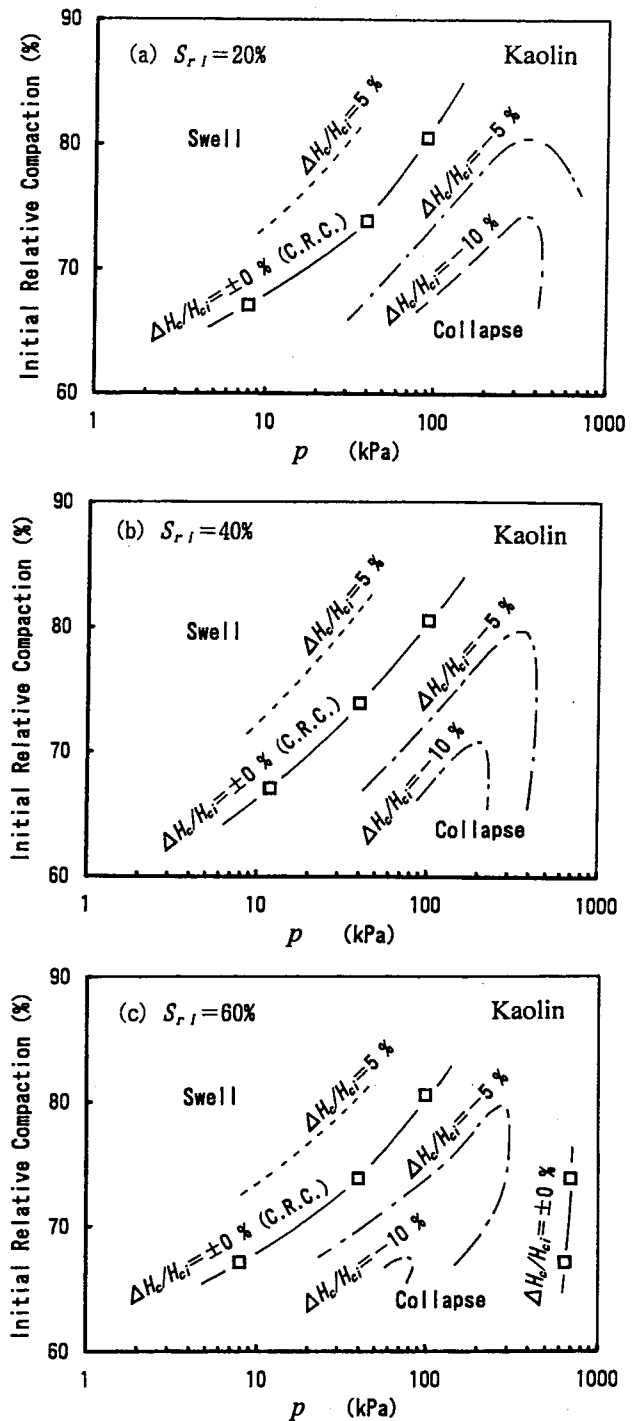


図-11 初期Relative Compactionと上載圧  $p$  に対する水浸に伴う体積変化量比  $\Delta H_c/H_{c,i}$  の関係 (カオリン)<sup>4)</sup>

とは、初期R. C. が小さな供試体では、 $p$ が大きくなると上載圧の負荷による圧縮変化量が増大して、土が安定した構造となり、その結果コラプス沈下が生じにくくなるものと考えられる。

同様にカオリンについても、初期Relative Compaction(R. C.)と上載圧 $p$ に対する水浸に伴う体積変化量比 $\Delta H_c/H_{c,i}$ の関係を図-11(a)~(c)に示す<sup>4)</sup>。図より、DLクレーと同様に、 $S_{r,i}$ によらずCritical Relative Compaction(C. R. C.)は、 $p$ の増加に伴って大きくなっており、膨張を生じる領域の $\Delta H_c/H_{c,i}$ についても同様の傾向が認められる。一方、コラプス沈下を生じる領域では、 $p$ の増加に伴い $\Delta H_c/H_{c,i}$ が一定値を示すR. C. は増加し、ピークを示した後再び減少する。同様の傾向はDLクレーでも認められたが、カオリンでは低い上載圧の範囲では膨潤挙動が卓越するため、高い上載圧の領域でコラプス沈下が発生しており、 $\Delta H_c/H_{c,i}=5, 10\%$ を示す線は、DLクレーに比べ急激な変化を示している。さらに、カオリンでは低い上載圧の範囲で、膨潤が発生しやすいことから、上載圧が低い条件下において、締固め度を必要以上に高くすると、膨潤による問題が生じることも考慮しなければならない。

シルト質土と粘性土および砂質土について、水浸に伴うコラプス沈下が生じないC. R. C. と上載圧 $p$ の関係を図-12に示す<sup>4)</sup>。土の種類の違いおよび $S_{r,i}$ によらずC. R. C. は $p$ の増加に伴って大きくなっており、水浸に伴うコラプス沈下を防ぐには、上載圧が大きいほどよく締固める必要があることがわかる。さらに、 $p=100\text{kPa}$ 程度以下ではC. R. C. は土の種類に依存し、コラプス沈下が生じやすいとされているシルト質土<sup>2)</sup>(DLクレー)でC. R. C. は高くなっている。このことは、シルト質土では、粘性土に比べ同じ上載圧条件下であっても、コラプス沈下が生じやすいことを示しており、シルト質土の締固め施工に際しては締固め度を高くする必要性を示唆している。

一般に、盛土施工時の締固め度は90%以上と規定されている<sup>9)・10)</sup>。しかしながら、その基準の工学的背景は明らかではなく、実際の盛土においても、上載圧や締固め時の飽和度等により土が水浸に伴い膨潤を生じたり、オーバーコンパクションの結果不経済な設計となる場合も少なくない。今回の試験結果から、この基準は上載圧が200~500kPa程度では十分妥当性のある指標と考えられるが、上載圧が小さくなると、低い締固め度でもコラプス沈下に関しては工学的に大きな問題とならないことが推察できる。このことから、コラプス沈下試験結果が、より工学的な施工管理を行うために有用であることが示された。また、室内試験および原位置試験から、締固めた土の力学的特性を考慮した、より経済的な締固め管理基準の決定方法がすでに提案されており、含水比・乾燥密度を変化させた締固め土に対して、その基準決定方法の適用性が検討されている<sup>11)・12)</sup>。本研究では、さらに締固め管理基準に影響を及ぼす諸要因を定量的に明らかにしており、水浸時のコラプス沈下挙動に関しては、土の種類、土の初期乾燥密度・初期飽和度、上載圧を考慮して、締固め管理基準を決定することが、安全性・経済性に優れた締固め施工管理を行うために必要不可欠であることを示唆した。

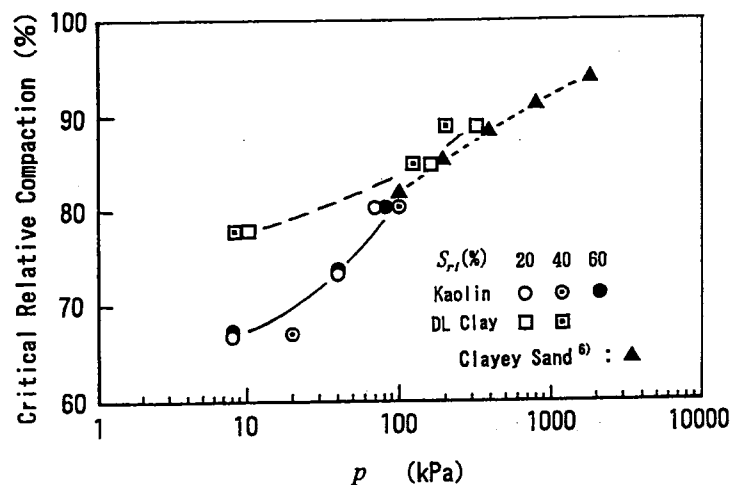


図-12 コラプス沈下に対するCritical Relative Compactionと上載圧 $p$ の関係<sup>4)</sup>

#### 4. まとめ

締固めたシルト質土の水浸に伴うコラプス沈下挙動に及ぼす主要因をある程度定量的に明らかにし、工学的な観点から実務における締固め施工管理への室内試験結果の適用性を示唆した。本研究より得られた主要

な結論を以下に列記する。

- 1) 水浸に伴うコラプス沈下量は、供試体の初期乾燥密度 $\rho_{d_i}$ の影響を大きく受け、 $\rho_{d_i}$ の増加に伴いコラプス沈下量は減少する。また、体積変化が生じないような $\rho_{d_i}$ が存在し、供試体の $\rho_{d_i}$ がその値を越えると土の挙動は膨潤に転じる。
- 2) 供試体の $\rho_{d_i}$ 、 $S_{r_i}$ によらず、水浸に伴うコラプス沈下量は上載圧の増加に伴い大きくなり、ピークを示した後ユニークな線に沿って減少する傾向がある。このことは、 $\rho_{d_i}$ によらず上載圧に対するコラプス沈下量の限界値が存在することを示している。
- 3) カオリンはDLクレーに比べ膨潤性が卓越しており、逆に、DLクレーは小さな $\rho_{d_i}$ の場合には、低い上載圧下においても水浸に伴って大きな沈下を示しており、既往の研究<sup>2)</sup>で報告されているように、シルト質土はコラプス沈下が生じやすいことが明らかとなった。
- 4) 供試体の初期乾燥密度および上載圧がコラプス沈下挙動に及ぼす影響は大きく、初期飽和度の影響は相対的に小さいものと考えられる。
- 5) 水浸に伴うコラプス沈下の生じない限界の締固め度が存在し、その限界締固め度(Critical Relative Compaction)は上載圧の増加に伴って大きくなる。
- 6) コラプス沈下試験より、水浸に伴うコラプス沈下を防止するには、上載圧に応じた締固め度を設定する必要性を示し、より安全性・経済性に優れた施工管理への室内試験結果の適用性を示唆した。

#### 【参考文献】

- 1) Dudley, J. H. : Review of Collapsing Soils, Proc. ASCE, Vol. 96, No. SM3, pp. 925-947, 1970.
- 2) Barden, L., McGown, A. and Collins, K. : The Collapse Mechanism in Partly Saturated Soil, Engrg. Geol., 7, pp. 49-60, 1973.
- 3) 亀井健史・榎本雅夫：締固めたシルト質土の水浸に伴うコラプス沈下挙動，土木学会論文集（投稿中）
- 4) 榎本雅夫・亀井健史：不飽和土の水浸に伴うコラプス沈下挙動，第29回土質工学研究発表会発表講演集，pp. 357-360, 1994.
- 5) Venkatarama Reddy, B. V. and Jagadish, K. S. : The Static Compaction of Soils, Geotechnique, Vol. 43, No. 2, pp. 337-341, 1993.
- 6) Lawton, E. C., Fragaszy, R. J. and Hardcastle, J. H. : Collapse of Compacted Clayey Sand, Proc. ASCE, Vol. 115, No. GT9, pp. 1252-1267, 1989.
- 7) Basma, A. A. and Tuncer, E. R. : Evaluation and Control of Collapsible Soils, Proc. ASCE, Vol. 118, No. GT10, pp. 1491-1504, 1992.
- 8) Cox, D. W. : Volume Change of Compacted Clay Fill, Proc. of Conference on Clay Fills, Institution of Civil Engineers, London, Nov., pp. 79-87, 1978.
- 9) 日本道路公団：設計要領 第一集 第一編土工，pp. 35-60, 1983.
- 10) 日本道路協会：道路土工－施工指針，pp. 180-211, 1986.
- 11) 太田秀樹・西田義親・国安逸朗・金子義信：土の締固め－管理基準と品質検査－，土と基礎，Vol. 34, No. 5, pp. 43-48, 1986.
- 12) 畠昭治郎・建山和由・藤本直昭：水浸時挙動を考慮した土の締固め施工基準の決定方法について，土木学会論文集，第382号／Ⅲ-7，pp. 227-235, 1987.